J. Plasma Fusion Res. Vol.87, No.4 (2011) 259‐267

解説

核融合炉ブランケット研究におけるベリリウム化合物の取り扱い

柴山環樹[1)]，中道　勝[2)]，宮本光貴[3)]，久我典義[4)]，
DORN Christopher K.[5)]，KNUDSON Theodore L.[5)]
[1)]北海道大学大学院工学研究院附属エネルギー・マテリアル融合領域研究センター，
[2)]日本原子力研究開発機構核融合研究開発部門，[3)]島根大学総合理工学部物質科学科，
[4)]マテリオンブラッシュジャパン株式会社ベリリウム機能材料部，[5)]Materion Brush Beryllium & Composites

（原稿受付：2010年12月30日）

ベリリウムは，(n, 2n)反応により中性子増倍材料として原子力では必要不可欠の機能材料である．核融合炉では，プラズマに対向するアーマー材料としても重要な機能材料である．近年，更なる高温強度や安全性を付与したベリリウム金属間化合物の研究開発が，日本を中心に進められている．そこで，ベリリウム金属間化合物の研究開発の状況を紹介しながら，安全に且つ機能材料として要求される材料科学的なデータを整備するための取り組みについて詳述する．

Keywords:
beryllium, intermetallic compound, fusion reactor, neutron multiplier, armor, blanket

1．はじめに（概要）

Beryllium (Be，ベリリウム）は，原子番号4でII族の元素である．常温常圧では固体で細密六方晶の結晶構造をとることが知られている．特にベリリウムは，(n, 2n)反応により中性子増倍材料として原子力では必要不可欠の機能材料である．核融合炉では，中性子増倍材料としてだけでなくプラズマに対向するアーマー材料としても重要な機能材料であることから多くの研究が行われてきた．一方，航空宇宙産業や身近な携帯電話にもベリリウム単体あるいは合金の添加元素として使用されている．材料工学分野では，X線回折装置のウインドウ材料として使われており，透過電子顕微鏡を用いて微量元素分析をする研究者にとっては，日頃ベリリウムホルダーに分析する試料をベリリウムワッシャーとベリリウムリングで固定する作業をしていることから，ある程度ベリリウムの取り扱いに習熟していると思っていると共にベリリウムが有する特性の恩恵に預かっている．近年，ベリリウムが有する機能を保ちながら更なる高温強度や安全性を付与したベリリウム金属間化合物の研究開発が，日本を中心に進められている．ベリリウムは，前述のように非常に重要な機能材料であるが，毒性を有することからその取り扱いに法律等遵守すべき項目が多く存在する．しかしながら，X線回折装置や透過電子顕微鏡のベリリウムホルダーの取扱説明書に「ベリリウムは毒性のある物質であるので加工しない，粉じんを吸引しない」，「金属ベリリウム製品は，外国為替および外国貿易管理法に定める戦略物質に該当するため，輸出する場合同法に基づく輸出許可が必要です」旨の記載があるものの多くの人々にとって研究対象の材料ではないためその取り扱い等についてはあまり知られておらず，ただ危険だというだけで敬遠されることが多い．そこで，著者らがこれまでに行ってきた研究や2007(平成19)年6月1日に発足した「核融合エネルギーの研究分野におけるより広範な取り組みを通じた活動の共同による実施に関する日本国政府と欧州原子力共同体との間の協定」により独立行政法人日本原子力研究開発機構と国立大学法人北海道大学を始め東北大学，室蘭工業大学，核融合科学研究所，京都大学，島根大学，九州大学，琉球大学と全国横断型の研究コンソーシアムにより進めている幅広いアプローチ活動（通称BA活動）による共同研究の成果を交えながら国内外の動向も含め，ベリリウム金属間化合物の研究開発の状況を紹介しながら，安全に且つ機能材料として要求される材料科学的なデータを整備するために取り組んでいる原子力機構や国内外の企業での取り組みや大学等での研究室での比較的小規模な取り扱いについて詳述する．

2．安全な取り扱いに関して（法令，安全衛生関係，手続き等）

ベリリウムおよびその化合物（>3 wt.%Be）(以下，「ベリリウム等」と称す）は，その粉じんやヒュームを吸入すると呼吸器の障害による人体への影響が生じることから，日本においては，労働安全衛生法に基づく労働安全衛生法施行令上，特定化学物質第1類物質に指定されており，特に溶融や切削等により蒸気や粉じん等を生じる作業を行う場合において，その作業場所では安全対策が必要となる

Safety Handling Procedures of Beryllium Intermetallic Compound on Fusion Blanket Study
SHIBAYAMA Tamaki, NAKAMICHI Masaru, MIYAMOTO Mitsutaka, KUGA Noriyoshi, DORN Christopher K. and KNUDSON Theodore L.
corresponding author's e-mail: shiba@ge.eng.hokudai.ac.jp

[1]．ここで「ヒューム」とは，固体物質の蒸発の凝固によって生じた微細な固体粒子のことを呼ぶ．研磨，切削などの作業工程で固体の物質が破砕されて生じた微小な粒子で，通常粒子径が約 150 μm 以下のものである「粉じん」に対して，ヒュームの粒子径は 1 μm 以下と小さいものが多い．

安全対策としては，労働安全衛生法に基づく特定化学物質障害予防規則上，ベリリウム等の粉じんの発生源を密閉する設備，局所排気装置等を設けなければならない．そして，同法に基づく告示「特定化学物質障害予防規則の規定に基づく厚生労働大臣が定める性能」として，局所排気装置の性能を表す値として「抑制濃度」を定めている．これは，発散源の周囲の有害物質をある濃度以下に抑えることによって，作業者の呼吸する作業域空気中の濃度を安全な範囲に留めようという考えで，許容濃度等を参考にして定められた値である．ベリリウム等における抑制濃度は，0.002 mg/m^3 である．また，設備の共用時には，同法に基づく作業環境評価基準において，作業場所でのベリリウム等の管理濃度が定められている．ベリリウム等の管理濃度は先と同様の 0.002 mg/m^3 であり，年 2 回の作業環境測定を行い確認する．

日本原子力研究開発機構（以下，「原子力機構」と称す）では，先進的中性子増倍材料であるベリリウムの金属間化合物（ベリライド）の研究開発のために，ベリリウム等の取扱設備を整備しているが，本活動は，労働安全衛生法に基づく特定化学物質障害予防規則上，「試験研究のための製造」と位置づけられており，商用の目的での大量のベリリウムを取り扱う「製造」とは区別されている．原子力機構におけるベリリウム等の取扱設備の概要については，次章で紹介する．

米国においては，米国職業安全衛生管理局において管理濃度に相当する数値が定められている．8 時間平均許容暴露限界値(PEL)として日本と同様の 0.002 mg/m^3 の値が，30分間暴露許容最大濃度(PEAK)として 0.025 mg/m^3，PEAK 値を除き超えてはならない数値(CEILING)として 0.005 mg/m^3 が示されている．

3．大型実験室における安全管理と研究開発の現状

大型実験室における安全管理と研究開発の現状として，原子力機構における設備整備等について紹介する．原子力機構では，ITER 建設と平行して，幅広いアプローチ(BA)活動を欧州との国際協力プロジェクトとして進めている[2]．そのBA活動における国際核融合エネルギー研究センター（IFERC）プロジェクトの一環として，青森県六ヶ所村に原型炉工学 R&D 活動のための研究施設である原型炉 R&D 棟を整備している（**図1-3参照**）．その施設において，先進的中性子増倍材料であるベリリウム金属間化合物（ベリライド）の研究開発のためにベリリウム（Be）製造施設室を設け，微小粒子，微小球，ブロック状の Be 金属間化合物の作製，金属間化合物の特性評価のため試料の加工，金属間化合物の特性評価等を行うべく，設備整備を実施している（**図 4 参照**）．当室は，入域管理室，排気制御室，そし

図 1　青森県六ヶ所村における BA 活動拠点．

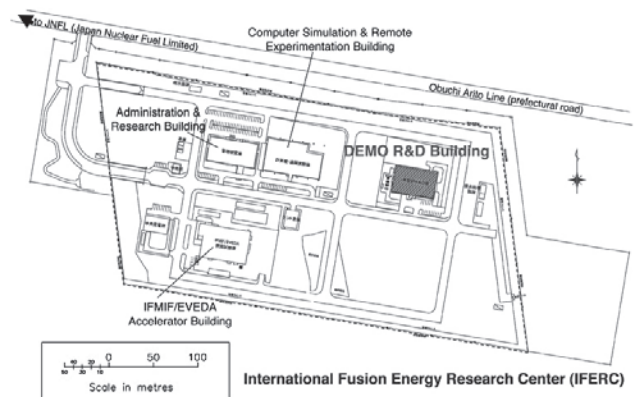



図 2　IFERC センター．

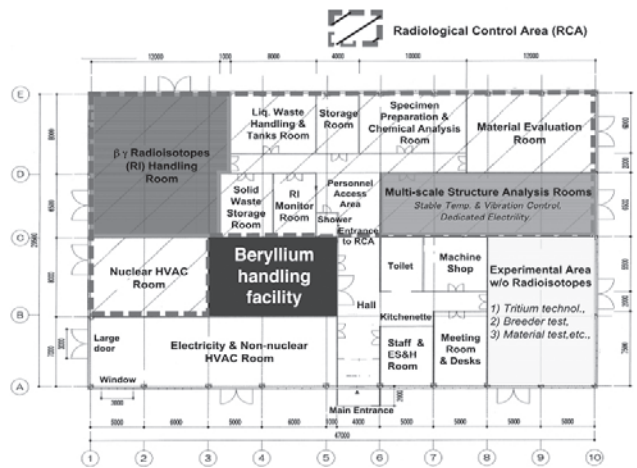



図 3　原型炉 R&D 棟．

て，ベリリウム等を取り扱うベリリウム製造室の 3 つのエリアに分かれている．ベリリウム製造室には，製造から加工および特性評価を行うための装置を設置する．

これらの活動は，先にも述べたが，「試験研究のための製造」と位置づけられており，商用の目的での大量のベリリウムを取り扱う「製造」とは区別されており，労働安全衛生法に基づく厚生労働大臣による「製造の許可」は必要としない．しかしながら，本施設では，ベリリウム等の取扱量は少量ではあるものの，粉じん等を生じる溶融や加工作業を含むために，部屋の仕様や，製造装置での安全対策

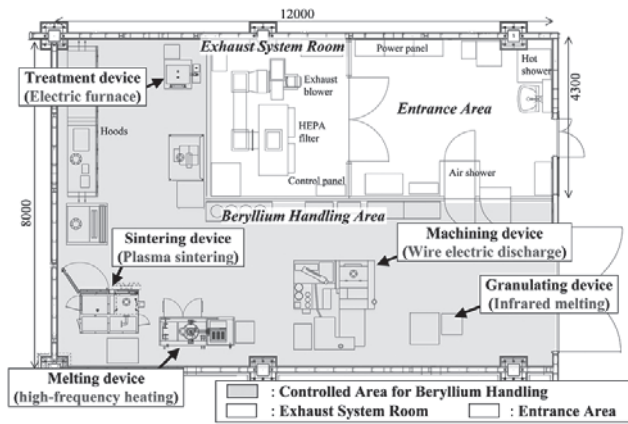
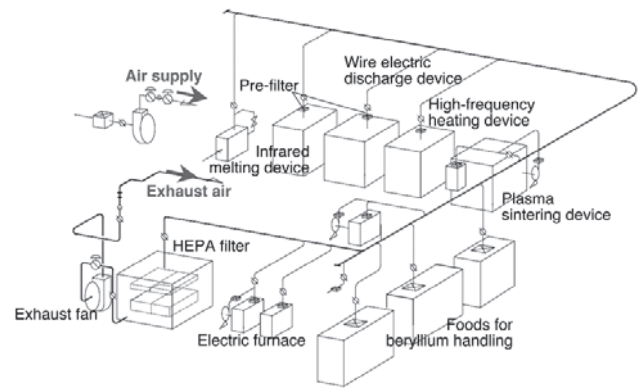
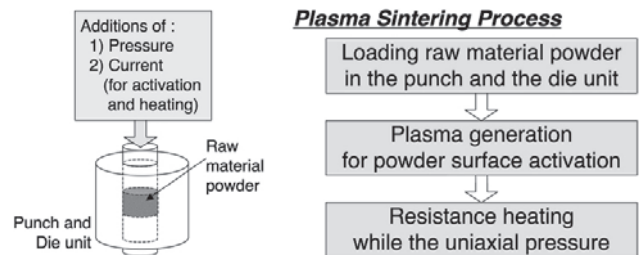



図4　Be 製造施設室.

図5　排気設備の系統図.

図6　プラズマ焼結法の概略プロセス.

を施している．その安全対策として，溶融装置等は基本的に溶融時には密閉構造とし，それら装置も局所排気装置としてのフードで覆い，粉じん等が拡散し難い構造としている．そして，各フードは排気装置に接続され，装置とダクトの接続間にはプレフィルタを配置し，最終的にはHEPAフィルタを通して排気している（**図5**参照）．局所排気設備に関しては，労働安全衛生法に基づく労働安全衛生法規則に定められた「製造設備等設置の届出」を行い，同法に基づく告示「特定化学物質障害予防規則の規定に基づく厚生労働大臣が定める性能」を有する設備を整備している．これは，局所排気により有害物質を発生源から作業環境へ拡散しないようにするための性能を定めたもので，先に述べた抑制濃度と同じく，有害物質を完全にフードに吸い込むために必要な気流の速度（制御風速）も定めており，粒子状のものの場合で1 m/sである．

併せて原子力機構における先進中性子増倍材料としてのベリライド研究開発の現状についても紹介する．現在，ベリライドの合成法の一つとして，プラズマ焼結法の適用性評価のため，ベリライドの試作試験を実施している．プラズマ焼結法の概略プロセスを**図6**に示す．本法は，グラファイト製の円筒容器（ダイ）に原料粉末を入れ，通電加熱しながら一軸圧縮して，放電により原料粉末の粒子表面を活性化して焼結性を向上させる手法である[3-5]．今回は，候補材の一つであるBe-Ti系ベリライドの試作試験結果について述べる．本試作の焼結条件は，焼結温度を1073，1173及び1273 Kとパラメータにして，純度99.9%のBeとTiの粒度<50 μmの始発混合粉末（混合比はターゲット材である$Be_{12}Ti$の化学量論値：92.3 at.%Be－7.7 at.%Ti）を用いて，圧力50 MPa，焼結時間20 minでベリライドの焼結性を確認した[6]．なお，本試験は，㈱化研のベリリウム取扱施設において実施した．当該社も，「試験研究のための製造」の設備を有しており，現在，原子力機構と共同でベリライド製造に係る研究開発を実施している[7]．

各焼結温度に対するプラズマ焼結試料の試作試験結果を**図7**に示す．X線回折測定結果から，低温側のプラズマ焼結温度1073 Kにおいては化合物化していない金属単体のBeとTiのピークが同定された．しかしながら，焼結温度が上昇するに伴い金属単体組成のピークは減少し，1273 Kでは化合物であるベリライド（$Be_{12}Ti$，$Be_{17}Ti_2$およびBe_2Ti）のピークがほとんどであった．この傾向は，温度が上がることによりプラズマ焼結による化合物化が進んだものと思われる．

電子線マイクロアナライザ（EPMA）により組成分析を実施した結果を基に，焼結試料の断面における各組成の占める面積の割合を求めて比較した結果から，Be元素の面積率は焼結温度の上昇に伴い減少していることが明らかとなった．一方，ベリライドは，焼結温度の上昇に伴って化合物化が進み，その割合は上昇することが明らかになった．また，再現性も確認されたことから，非常に簡便かつ廉価に金属間化合物を合成できる見通しを得ることができた．現在，大学等の協力を得て，合成したベリライドの特性評価を進めており，今後は，六ヶ所原型炉R&D棟のベリリウム製造施設室において，さらなる製造試験および特性評価を進める．

4．商業規模施設における安全管理

商業規模設備における安全管理として，米国のマテリオンブラッシュ社の設備について紹介する．マテリオンブラッシュ社は世界最大のベリリウム金属およびベリリウム化合物の製造会社である．固体において，ベリリウムは特別有害な物質ではないが，しかし，ある状態においては，ベリリウムは特定の環境下で健康・安全（EH&S）のリスクを生じる．マテリオンブラッシュ社では，それらのリスクを理解し，状況に応じて対応するための積極的な体制をとっている．医学的な見地については，第6章で詳細に述べるが，ベリリウムの安全取り扱いに関する米国規制に基づく設備を整備しており，その基準等にも関連して述べる．

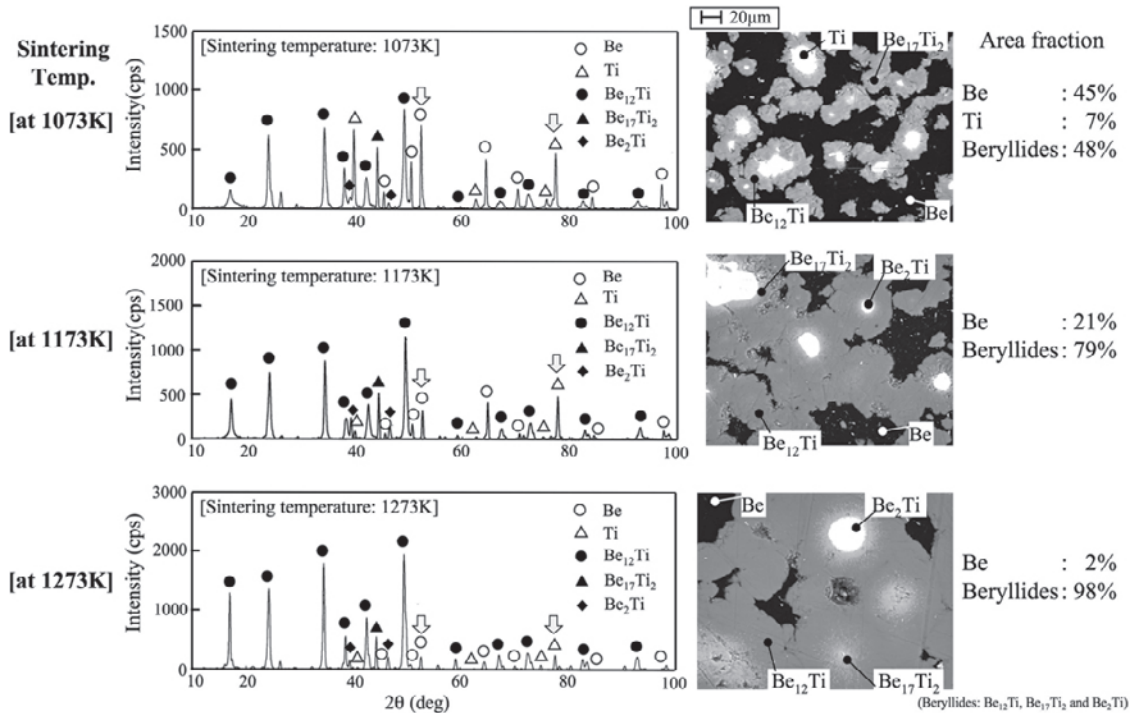



図7 Be-Ti 系ベリライドの試作結果.

ベリリウムに関する主要な EH&S リスクは，肺病である“慢性ベリリウム病(CBD)”であり，その発病には三つの条件が存在する．即ち，1)ベリリウム暴露を被った人が，ベリリウムに対して敏感なこと，2)吸引したベリリウム粒子が 10 μm 以下であること，そして，3)ベリリウムの粒子は，ホコリ，ガス又は蒸気の状態であることである．

CBD とは，感応性は強い人の肺に働く免疫作用であって肺が炎症を起こすことである．この炎症は傷を伴い，肺を硬くし，呼吸しづらくし，肺と血液との間の酸素循環を妨げることもある．その CBD は，ほとんどの人には発病しないものである．CBD の進行は，医学的には個人の遺伝的性質に関係するかもしれないと言われているが，残念なことに，ベリリウム感受性のリスクをもった人を識別するための遺伝的検査は成功していないのが現状である．それゆえに，すべての人々が危険にさらされないようにする必要がある．一般的に，一日平均 8 時間労働にて，ベリリウムは $2\ \mu g/m^3$ 以下の大気濃度でなければならないと言われている．この基準は色々な政府機関や標準化組織により再検討されており，近い将来に変更される可能性があるが，現在マテリオンブラッシュ社では，この数年間，ベリリウムを扱う全工場にて，一日平均 8 時間労働で大気濃度 $0.2\ \mu g/m^3$ 以下の環境で働くように推奨している．現在，これはカリフォルニア州の法律となっている．

マテリオンブラッシュ社におけるベリリウムに対するリスク認識について述べる．マテリオンブラッシュ社は，過去20年間，ベリリウム暴露について学んできた内容に応じてベリリウムの取り扱い方法を適宜改良している．1980年代まで，マテリオンブラッシュ社の工場では，区切られていない大きなフロアーで作業しており，一般作業場での一般的なエアーサンプリング技術を用いてベリリウムを調査し続けてきた．しかし最近では，すべての作業に潜在している危険・リスクを査定しており，リスク区分に従い各工程を隔離している．この暴露特定プロセスのフローチャートを図 8 に記す．

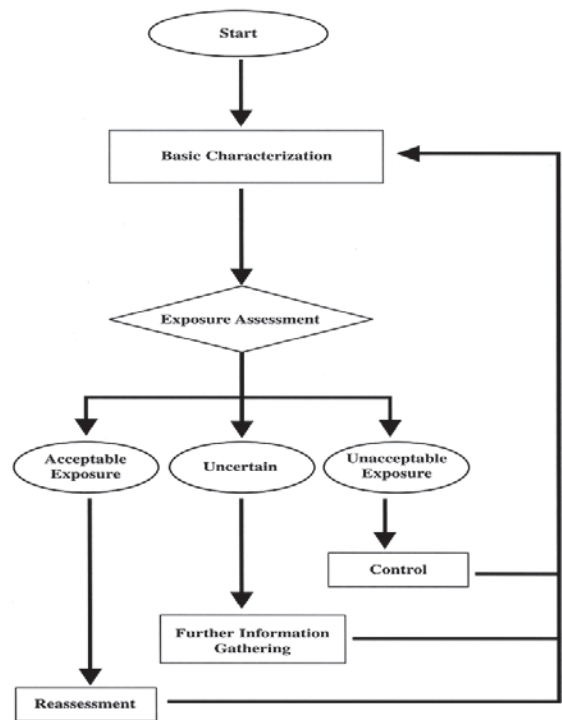



図8 暴露特定プロセスのフローチャート.

製造工程は，“低いレベルだが，吸入が発生しうる工程”もしくは“吸入しやすい工程”のどちらかに分類されている．“低いレベルだが，吸入が発生しうる工程”の例としては，陽極酸化処理，組み立て加工，取り扱い，手作業で

の溶剤洗浄，検査，塗装およびメッキ作業が挙げられる．また，“吸入しやすい工程”の例としては，粉末製造，接合，ロウ付け，鋳造，化学研磨，カッティング，押し出し，グラインダー，熱処理，機械加工，溶解，磨き，粉末を扱う作業，切り出し，真空蒸着および溶接がある．これらは，すべての工程を網羅しているわけではないので，暴露評価は個々のベリリウム取り扱い工場におけるすべての工程に対して行っている．

次に，マテリオンブラッシュ社でのベリリウムマネジメントプラン（BMP）について説明する．BMP はベリリウム暴露を最小限に設計するための管理モデルのことである．BMP 又は Beryllium Worker Protection Model（BWPM）は，ベリリウムを含んだ物質を加工する場合に，作業でのベリリウムの敏感性を抑え込む効果があることが証明されている．BMP は８つの項目の達成をめざしたベリリウム管理リストである．そのベリリウム敏感性を抑え込む効果がある８つの項目は，１)作業の現場および工程の清掃，２)肺へ入れない，３)皮膚からの除去，４)衣類からの除去，５)原料取扱い，６)作業工程環境，７)工場環境，および，８)作業者の準備である．

そして，BMP は次の４つの暴露管理手法によってサポートされている．１)設備的な管理，２)作業者訓練による管理，３)管理者による管理，そして，４)個人防護による管理である．各々の具体的な管理を**図９**に示す．

図10にマテリオンブラッシュ社の工場でベリリウムを旋盤する際の局所排気（LEV）設備を示す．二つのホースは高速・低量の換気のために使われている．LEV は設備的な管理の例である．**図11**は，不透過タイプの手袋やボディースーツ等の頑強な皮膚保護具，且つルーズ装着タイプの空気浄化呼吸器（PAPR）を装着したマテリオンブラッシュ社員の作業時の写真である．作業員の安全性に対して，設備的な管理では不十分な場合には，危険レベルに適応した個人防護による管理が必要となる．

マテリオンブラッシュ社では，雇用者および従業員がベリリウム作業者保護モデルの情報を利用できるようにする

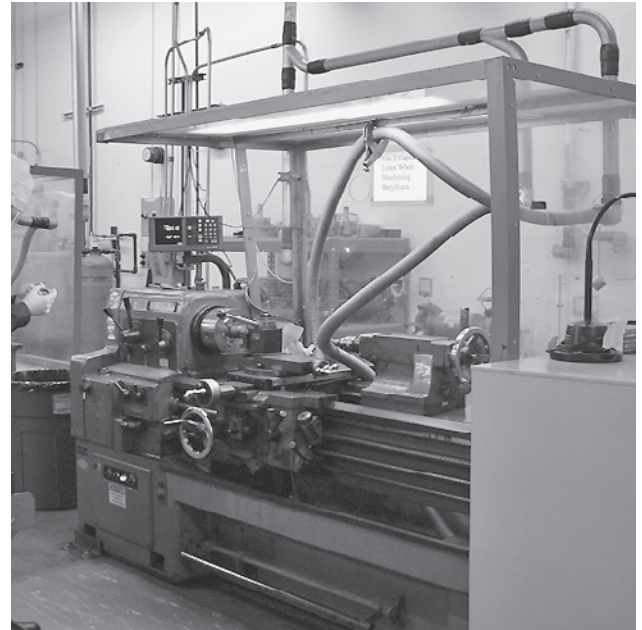



図10 局所排気（LEV）設備．

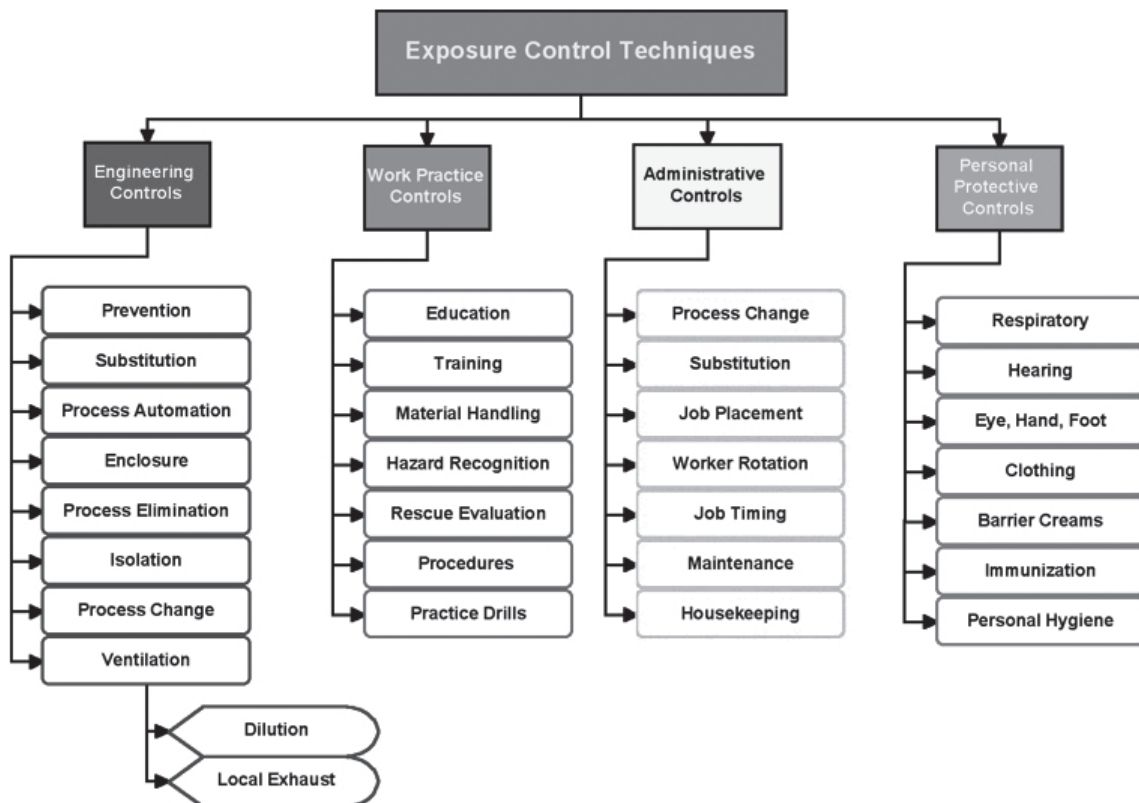



図９ 暴露管理手法の詳細．

図11 個人防護装備を装着したベリリウム作業者.

ため，ベリリウムおよびベリリウム化合物の対話方式のガイドを新たなツールとして提供している．この対話方式のガイドは，「http://www.berylliumsafety.com/」で閲覧可能である．このガイドは，ベリリウムおよびベリリウム化合物の安全な取り扱いのための重要な基礎的情報を提供している．

マテリオンブラッシュ社では，もっとも効果的なEH&Sは，設備的な管理および作業訓練を利用して，ベリリウム発生源を管理することと信じて安全管理を実施している．例えば，工程確立中である場合や設備的な管理がまだ未完全な場合のように，特定の作業での暴露リスクが不確定の場合には，保護具の着用を続けて，安全性を重視して作業管理している．

5．大学等の実験室（湿式電解研磨，イオン照射，電顕観察等）

大学等での比較的小規模な取り扱いについて詳述する．これまでに，旧日本原子力研究所と国内の大学並びに国内企業との共同研究によりベリリウム金属間化合物の創成期の研究開発が進められてきており，それらの成果はreview paper[8,9]や報告書[10-13]にまとめられているので参考にされたい．これまでの研究開発が基礎研究を中心とした創成期であるとすると先に紹介したBA施設を中核とした現在の共同研究は，実用化に向けた橋渡し期に相当すると言える．そのため，実験室規模のベリリウム金属間化合物で行っていた評価方法は，実用化に向けた革新的なプロセスによるパイロットプラントによる材料の評価にもそのまま適用可能であり，現時点では材料科学の組織学的な研究が中心である．ベリリウム金属間化合物の取り扱い方法や研究の手法は創成期で学んだことを踏襲し更に安全な取り扱いを心がけている．国立大学は国立大学法人化以後，国家公務員に対する人事院則に替わり労働安全衛生関係の法令に一元化し各大学で安全衛生管理室を設け研究に係る安全管理を推進している．そのため，管轄の労働安全基準局と安全衛生管理室と連携をとり，十分な安全を担保して研究を推進することが重要である．それでは，以下に大学等の比較的小さな規模での取り扱いについて詳述する．

大学等の比較的小さな規模の実験室で行っている研究の各論に入る前に，全体を解説する．先に述べた，BA施設のような大型実験室や商業施設ではベリリウムの溶解や焼結あるいは加工といった金属材料にとって一般的な工程を行うことができるように管理されている．大学でもドラフトフード等の局所排気装置は整備されており，そこでBA施設のような大型実験室や商業施設で行っている試験と同様な実験を行うことは可能であるが，施設の設備を共用していることや管理運営の観点から有効でない．そこで，小規模実験室での取り扱いは，粉じんやヒュームが出る乾式研磨等の作業を行わなくてもよいように大型実験室で予め薄板あるいは薄片化して持ち込むことに限定している．つまり，小規模実験室では溶解並びに乾式研磨や切断等の作業は一切行わない．故に，引張試験等の機械的特性を評価することは行っておらず今後BA施設の実験設備を共同利用の形態で使用し研究を進める予定である．また，小規模実験室では，ある目的のためだけの実験室や装置を整備することが難しく，共有で利用することが多い．しかしながら，そのような環境下でも十分な安全を担保する必要があることから，ベリリウム金属間化合物を取り扱うにあたって，先ず最初に環境濃度測定を実施することとした．具体的には，重水素やヘリウム等のイオン照射や極表面のアルゴンイオン研磨並びに電解研磨等の一連の取り扱い作業中における環境濃度測定を第3者機関に依頼し，安全に取り扱えるかどうかを確認した．環境濃度測定は，それらの一連の作業中においてエアーサンプラーを用いて実験室の大気中の粉じんなどのダストサンプリングを行い，実験室の空気をろ過したエアーサンプラーのフィルターを溶媒に浸漬してフィルターに吸着あるいは濾し取られたダストを溶解しその溶液をICP発光分析装置を用いてベリリウムの微量分析を行った．その結果，何れの作業中もベリリウムは検出限界以下のため，十分な安全が担保されているとしてこれらの作業に限定して実験を行っている．一方，誤った取り扱いや予期せぬ破壊が取り扱い中に生じる可能性があることから，ベリリウム金属間化合物を取り扱う時は，常に保護手袋（アレルギー体質によりビニール製と天然ゴム製等を使い分けることが必要），特定化学物質取り扱いに対応したマスク（例えば，3M社製防じんマスク8210J-DS2）を着用して実施するように取り扱い手順を定めて行っている．また，誤った取り扱いや予期せぬ破壊のような緊急時に対応する機器としてULPAフィルターを装着した掃除機（例えば，東浜社製TOHIN AS-100M）を用意している．こ

の掃除機は，Thermal Desorption Spectroscopy（TDS，昇温脱離ガス分析法）やイオン加速器等のロータリーポンプのオイルミストトラップ後段の多重防護のためのフィルターとしても有効である．核燃料物質の取り扱いには，バッチ番号で数量管理を行い，定期的な保障措置に基づく検査が行われる．これらを参考に，ベリリウム金属間化合物も少量の取り扱いではあるが，安全な取り扱いを推進するために受領した試料にバッチ番号等を割り振りログノートブックに記録して管理するようにしている．

以下に，大学等の小規模な実験室で行っている各研究について紹介する．核融合ブランケットで用いられる中性子増倍材料は，中性子による弾き出し損傷だけでなく(n, α)反応によって多量のヘリウムが材料内部に生成する．その量は，当初のITERテストブランケットモジュールの規模でおよそそれぞれ10 dpaと3000 appmHeと見積もられており，DEMO炉ではさらに2倍以上の過酷な条件をクリアしなければならないと想定されている．しかしながら，材料試験炉による中性子照射実験には照射量だけでなく中性子のスペクトルにより十分な核変換ヘリウムが生成されないことから，イオン加速器を利用したシミュレーション実験を先行して行い，核融合中性子源が実現した後は，それらを利用した工学的な実証試験を行ってライセンシングデータの整備をすることが予定されている．**図12**に北海道大学に設置されているマルチビーム超高圧電子顕微鏡を示す．そこで，北海道大学のマルチビーム超高圧電子顕微鏡のイオン加速器を利用して重水素やヘリウムイオン照射を行い，前者の場合はTDSによる注入した重水素の昇温脱離挙動の研究に，後者は照射後ナノインデンターによる注入領域の硬さを評価し，大量のヘリウムによる脆化の研究を行っている．**図13**に昇温脱離ガス分析装置を示す．イオンビームは試料に対して垂直に照射されることから，スパッタは非常に少なく，排気系はすべて集中配管されており屋外へ拡散排気されるようになっているため，イオン照射中に破壊等が起きても粉じんが実験室内に浮遊することはない．前述した環境濃度測定でも排気中のダストサンプリングでは検出限界以下であったが，試料をイオン加速器の照射装置に取り付け取り出す際には，保護手袋とマスクを装着し，誤った取り扱いや予期せぬ破壊のような緊急時に対応する機器としてULPAフィルターを装着した掃除機による対応を行っている．透過電子顕微鏡によるEnergy Dispersive X-ray Spectroscopy（EDS，エネルギー分散型X線分光法）分析に携わったことのある読者は，ベリリウムホルダーに分析する試料をベリリウムワッシャーとベリリウムリングで固定する作業中に極稀に破損することがあることを理解していると思われるが，これまでに，ベリリウム金属間化合物が照射中に破壊したり取り扱い中に破壊したことはなく，純ベリリウムよりベリリウム金属間化合物がより高い機械的強度を有していることを示していると考えられる．

図14にナノインデンターによるヘリウム照射硬化を示す．100 keVで注入したヘリウムは，ディグレーダーを用いていないため表面から深さ方向にある分布をもってい

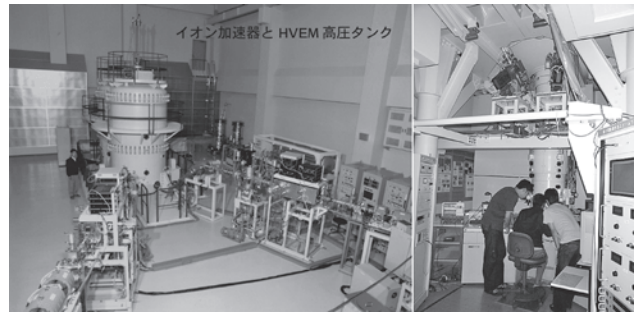



図12　北海道大学に設置されているマルチビーム超高圧電子顕微鏡．（左図）イオン加速器および高圧タンク室，（右図）観察室．

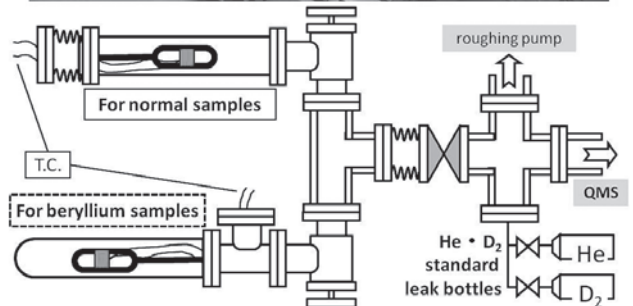
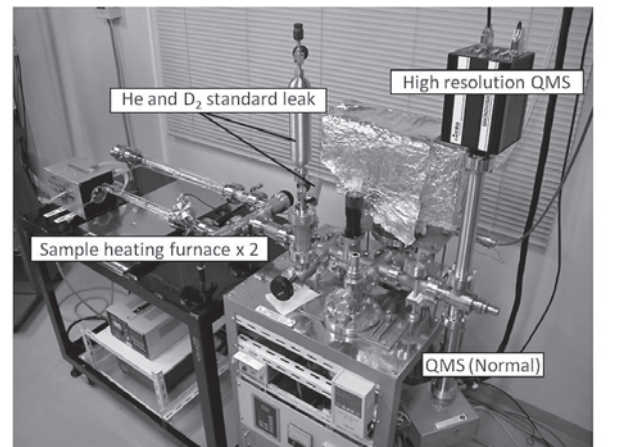



図13　昇温脱離ガス分析装置．

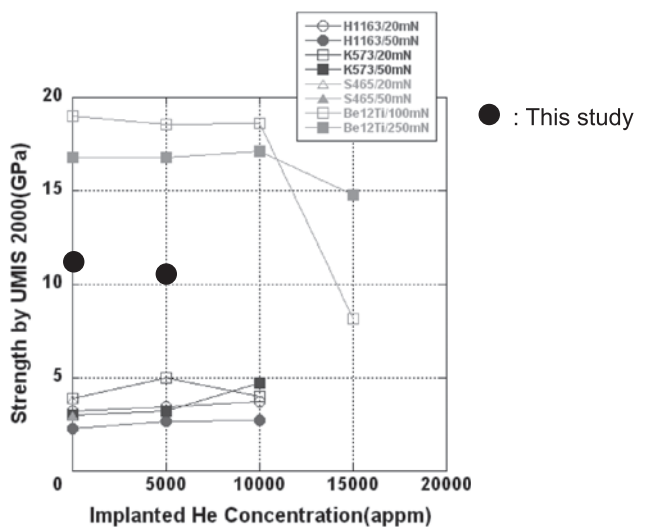



図14　ナノインデンターによるヘリウム照射硬化評価．

る．注入濃度の一番高い深さは約1 μmであり，鉄鋼材料のようにすべり系が十分な材料に対しては，注入ピークの手前までナノインデンターで圧子を押し込んで評価することが一般的であるが，ベリリウム金属間化合物は複雑な結晶構造ですべり系が少ないため，注入ピークまでナノインデンターで圧子を押し込んで評価した．実験室規模のベリリウム金属間化合物と比較すると，パイロットグレードのベリリウム金属間化合物は，前者が粉末冶金，後者がSPS反応焼結とプロセスが異なることから，後者の方が不純物や介在物が少なく，照射前の硬度が低いことがわかる．ナノインデンターによる圧痕の周りにはクラック等が発生していないことから，十分に塑性変形しており脆化していないことがわかる．今後，パイロットグレードのベリリウム金属間化合物の量産化に合わせてヘリウム照射硬化に関するデータベースを整備する計画である．

次に，核融合環境で使用する機能材料にとって重要な照射効果を研究するための湿式研磨による TEM 薄膜作製方法とマルチビーム超高圧電子顕微鏡を利用し核融合環境を模擬した電子線／ヘリウム同時照射下における微細組織発達のその場観察について紹介する．湿式研磨は，TEMを使用する研究室ではきわめて一般的なストルアス社のテヌポール5を利用している．電解研磨液は，メタノールと冷却時の粘性を保つためのイソブチルアルコールおよび過塩素酸を14：1：1の比率で混合し，電解液を－10℃程度まで冷却してツインジェット研磨を行っている．電解研磨装置自身は，局所排気装置であるドラフトフード内を放射性物質の実験で使用するポリエチレンろ紙で養生して，実験中はイオン加速器の時と同様に保護手袋とマスクを着用して実験を行っている．使用後のポリエチレンろ紙等は通常の可燃性ゴミとして処理し使用済みの電解研磨液並びに洗浄液等は他の化学廃液と同様に適切に処理を行っている．**図15**にマルチビーム超高圧電子顕微鏡を利用し室温にて電子線／ヘリウム同時照射下において高分解能観察した結果を示す．ベリリウム金属間化合物は，複雑な結晶構造ですべり系が少ないため明瞭な照射欠陥が観察できないことが報告されている．今回，パイロットグレードのベリリウム金属間化合物を電子線／ヘリウム同時照射実験を行ったところ，照射直後は明瞭な結晶面に相当する格子像が観察できたが，1.25 MeV の電子および 100 keV のヘリウムをそれぞれ 1.4×10^{21} electrons/cm^2, 9.3×10^{14} He ions/cm^2 まで照射したところ，実験室規模のベリリウム金属間化合物と同様にブラックドット等の明瞭な照射欠陥は観察できなかった．**図15**(b)に示すように格子像が不明瞭になり，TEM薄膜が湾曲したことによる歪コントラストが観察できた．これは，点欠陥集合体形成には至らないが金属間化合物特有のベリリウムとチタンの規則的な原子配列が不規則化することや照射誘起非晶質化により原子間結合距離が局所的に変化することよるTEM薄膜の湾曲（しわ）に起因すると考えられる．今後，イオン照射や超高圧電子顕微鏡を用いたシミュレーション照射と材料試験炉等を利用した中性子照射と組み合わせて系統的な研究を進める予定である．

図15 パイロットグレード $Be_{12}Ti$ 合金の室温における電子線／He 同時照射その場高分解能観察，(a)照射開始直後，(b) 1.4×10^{21} electrons/cm^2，9.3×10^{14} He ions/cm^2.

6．医学的な見地から

ベリリウムおよびその化合物が人体に与える影響として特に重度なものとしては，慢性ベリリウム症（CBD）がある．慢性ベリリウム症（CBD）とは，過敏症の人の肺にベリリウムを含む粒子が進入すると免疫システムが反応し，肺に炎症を起こす現象を指す．この炎症は瘢痕（はんこん）化して肺を硬くし，呼吸困難を引き起こして肺と血液との酸素交換を阻害する．

このCBD発症には，3つの要素が絡んでおり，すべてが存在する場合に起こる．まず，ダスト，ヒューム，ミストの形の浮遊ベリリウムに曝されること．2番目は，粒子は肺胞に到達できるほど小さい（頭髪の10分の1のサイズ）こと．3番目は，ベリリウムに敏感な体質．CBDはほとんどの人では起こりえず，医科学ではCBDの発症と進行は遺伝的な要素が関係していると見ている．

1980年代末までは，CBDは作業者が臨床的症状を示し，X線検査や肺機能検査で変化が見られた場合のみ認識されており，現在，これは臨床的CBDと呼ばれている．臨床的CBDは重篤で，しばしば致命的な肺疾患になる．1980年代末と1990年代初期に，CBDの診断は，臨床的症状や検査値の異常が見られない場合も含められるようになった．その場合，CBDはベリリウム血中リンパ球増殖試験（BeBLPT）と生体検査を伴う気管支鏡検査との併用によって認定される．BeBLPTが陽性で，生体検査において肉芽種とよばれる顕微鏡的生体肺の形成の存在によって，患者は準臨床的または要観察CBDとして認定される．

臨床的CBDの症状は，息切れ，乾いた咳，ゼーゼー音，体重減少，寝汗，疲労感などである．これらの症状は通常の呼吸器疾患に共通するものなので，CBDと区別するのは困難である．臨床的症状のある患者では，胸部X線写真には異常は見られないが，小結節，リンパ節肥大，大きい瘢痕などが見られることもある．肺機能試験では肺活量の減少，肺におけるガス交換の減少などが見られる．

最後にベリリウム過敏症についてであるが，これは人の免疫システムがベリリウムに反応する現象で，通常，BeLPTを用いて検査している．BeLPTが陽性であれば，血中の細胞がベリリウムに触れた時に急速に増大する．これはリンパ球増殖と呼ばれており，細胞の増大量（リンパ球増殖）を測定し，2回以上の試験で増大率が既定値を超

えた場合はベリリウム過敏症と判定されるが，本結果だけでCBDかどうか判断するものではない．ベリリウム過敏症は病気や障害ではなく，健康問題とは考えられてはいない．

7．まとめ

将来の核融合DEMO炉のブランケットを構成する中性子増倍材料や炉内のアーマー材料として期待されており，日本がリーダーシップを取って研究開発を進めている高い安全性と優れた機能を有するベリリウム金属間化合物の現状について概説するとともにベリリウム金属間化合物の研究開発に携わる企業や研究所並びに大学に所属する研究者が取り組んでいる安全な取り扱いについて詳述した．本稿を機会に，ベリリウムに対する理解が深まるとともに将来，核融合炉材料研究に携わる若い研究者や大学院生がこの分野へ挑戦してみようと思う契機になれば幸甚です．

参考文献

［1］中央労働災害防止協会編：特定化学物質・四アルキル鉛等作業主任者テキスト（2009）．

［2］T. Nishitani, H. Tanigawa, S. Jitsukawa, T. Nozawa, K. Hayashi and T. Yamanishi *et al.*, J. Nucl. Mater. **386-388**, 405 (2009).

［3］M. Wada *et al.*, Magnetics, IEEE Transactions **26**, 2601 (1990).

［4］J.R. Groza *et al.*, J. Mater. Res. **7**, 2643 (1992).

［5］T. Abe *et al.*, FGMnews-015-010, 21 (1991) (*in Japanese*).

［6］M. Nakamichi and K. Yonehara, *to be published in* J. Nucl. Mater. doi:10.1016/j.jnucmat.2010.12.140

［7］http://www.kakenlabo.co.jp/04catalog/kakuyuugou.html

［8］Y. Mishima, N. Yoshida, H. Takahashi, K. Ishida, H. Kawamura, T. Iwadachi, T. Shibayama, I. Ohnuma, Y. Sato, K. Munakata, H. Iwakiri and M.Uchida, Fusion Eng. Des. **82**, 91 (2007).

［9］Y. Mishima, N. Yoshida, H. Kawamura, K. Ishida, Y. Hatano, T. Shibayama, K. Munakata, Y. Sato, M. Uchida, K. Tsuchiya and S. Tanaka, J. Nucl. Mater. **367-370**, 1382 (2007).

［10］平成14年度九州大学共同利用研究集会「先進核融合機能材料としてのベリリウム金属間化合物に関する研究集会」資料集，九州大学応用力学研究所，平成15年3月．

［11］平成15年度九州大学共同利用研究集会「先進核融合機能材料としてのベリリウム金属間化合物に関する研究集会」資料集，九州大学応用力学研究所，平成16年3月．

［12］平成16年度九州大学共同利用研究集会「先進機能材料であるベリリウム金属間化合物の実用化に関する研究集会」資料集，九州大学応用力学研究所，平成17年3月．

［13］平成17年度九州大学共同利用研究集会「先進機能材料であるベリリウム金属間化合物の実用化に関する研究集会」資料集，九州大学応用力学研究所，平成18年3月．

柴山環樹（しばやま たまき）

北海道大学大学院工学研究院准教授．電子顕微鏡を使って材料の微細構造や破壊挙動を日夜研究しています．冬のスキーにもかかわらず最近スウェリング気味です．写真は，愛車ではなく雪祭りの日の体験試乗会のくじ引きに当たって試乗したニスモのGT-Rです．レースカーでもベリリウムは使われたことがあり最近では高弾性材料の添加元素として使用されていました．

宮本光貴（みやもと みつたか）

2004年九州大学大学院総合理工学府博士後期課程修了．島根大学総合理工学部物質科学科助教．専門はプラズマ・壁相互作用．照射損傷に関連した様々な現象に興味を持っています．趣味は旅行．最近は第二子が誕生し，かまってもらえなくなったもの同士，長男と二人で遊びに出る機会が増えました．

DORN Christopher K.

米国MITにて化学およびフランス文学専攻後，1981-1985に海兵隊所属．1987年にマテリオンブラッシュ社（旧ブラッシュウエルマン社）に入社．オハイオ州やカリフォルニア州の事業所で24年間エンジニア・営業技術職・管理職を経て，現在，ベリリウム＆コンポジット事業部セールス＆マーケッティング部門ディレクター．17年連れ添っている妻とカリフォルニアでの生活を満喫中．趣味は，海外で色々な文化に出会うこと・切手収集・野球・ビンテージワインの収集等．

中道　勝（なかみち まさる）

日本原子力研究開発機構　核融合研究開発部門　核融合エネルギー工学研究開発ユニット　ブランケット照射開発グループ所属．東北大学大学院工学研究科博士後期課程修了（博士(工学)）．妻と長男，長女の4人家族．家族の全面的なサポートを受け，平成23年度より青森県六ヶ所村で本格的なベリライドR&D活動へ．主な研究分野は，増殖ブランケット機能材料研究開発など．

久我典義（くが のりよし）

早稲田大学工学部金属工学科修士課程専攻．精密機器メーカーにて無機材料系の技術開発，営業技術，電気モジュールの営業職に従事し，現在はマテリオン ブラッシュ ジャパン社 ベリリウム機能材料部課長．汗を流すことが好きで，以前はバレーボールをしていましたが，年と共に怪我のリスクが高いため，最近はもっぱらジョギング．様々な特徴を持つベリリウムを地道に色々な分野に拡げるべく，スポーツで体力を蓄えています．

KNUDSON Theodore L.

米国ペンシルバニア大学の環境資源学科卒業後，テンプル大学で環境科学科の修士取得．29年間，産業衛生，環境管理の分野に従事．内17年間はベリリウム関連の業務．1989年に米国の産業衛生の国家資格を取得．現職はテリオン ブラッシュ社 ベリリウム＆コンポジット事業部 生産管理部門ディレクター．趣味はアウトドアスポーツ．3人の子と3人の孫を持つ．